

УДК 550.34

ОБ УРОВНЕ ГЕНЕРАЛИЗАЦИИ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

© 2024 г. Р. Э. Татевосян*

*Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта, РАН, Москва, Россия***E-mail: ruben@ifz.ru*

Сейсмотектонические домены являются основой оценки сейсмической опасности на уровне Общего сейсмического районирования (ОСР). В статье анализируется фрагмент карты сейсмотектонических доменов. Показано, что не все домены представляют однородные сочетания сейсмических и тектонических признаков, как предполагалось при их формулировке. Иногда из-за высокой степени генерализации данных домены объединяют весьма разнородные участки. Вместе с тем, показано, что совсем отказаться от обобщающих сейсмотектонических моделей и опираться только на карты активных разломов, неоправданно. Высказано предположение, что явно выраженные индивидуальные особенности сильных землетрясений, в том числе, практически одинаковых магнитуд, отражают естественную изменчивость свойств объекта. Это накладывает ограничения на возможности оценки сейсмической опасности.

Ключевые слова: сейсмотектонические домены, общее сейсмическое районирование, сильные землетрясения.

Для цитирования: Татевосян Р.Э. Об уровне генерализации сейсмотектонических моделей // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16. № 3. С. 114–121.
http://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_3_114

Введение

70-летнему юбилею М. А. Садовского был посвящен номер журнала Физика Земли, в котором была опубликована статья [Бунэ и др., 1974]. В ней подводились итоги и формулировались пути достижения будущих успехов сейсмического районирования СССР. В частности, в качестве основного направления развития работ в этой области указывался вероятностный подход. В этом отношении ожидания авторов статьи оправдались. Одним из успешных шагов в статье [Бунэ и др., 1974] отмечалось введение «двухстадийной схемы сейсмического районирования», которая разделила задачи детального сейсмического районирования и сейсмического микрорайонирования. Первая должна была определить размещение будущих вероятных очагов землетрясений, а во второй – определяется распределение интенсивности сотрясений на поверхности.

Настоящая статья касается только первой стадии, вопросы расчета сейсмических воздействий и сейсмического микрорайонирования не затрагиваются. Фактически, обсуждается сейсмотектоническая основа районирования.

Хотя первая стадия формулировалась как детальное сейсмическое районирование, предполагалось, что методически нет проблем в том, чтобы охватить районированием всю территорию страны. На практике оказалось, что все не так просто. При расширении районизируемой территории должна обеспечиваться однородность оценок опасности: за оценкой, скажем, 6 баллов на Кавказе и в Прибайкалье должны стоять сопоставимые по полноте и точности исходные данные. Для решения этой проблемы Н. В. Шебалин предложил идею сейсмотектонических доменов. Она разрабатывалась в 1993–1995 гг. в рамках работ по ОСР97, хотя была опубликована много позже, благодаря усилиям В. Г. Трифонова [Shebalin et al., 2000]. Фактически карта сейсмотектонических доменов, с небольшой корректировкой, до сих пор остается основой карт ОСР.

В статье обсуждается приемлемость модели сейсмотектонических доменов, разработанной для уровня ОСР, для оценки опасности конкретных площадок размещения объектов строительства, в том

числе, повышенной опасности. Возможно ли для этой цели обходиться исключительно актуальной картой активных разломов, или некоторый уровень генерализации неизбежен?

Концепции сейсмотектонических доменов

Согласно определению [Shebalin et al., 2000] сейсмотектонический домен – это некоторый объем земной коры, который определяется сочетанием сейсмических и тектонических признаков. Большим преимуществом концепции, заложенной в модель сейсмотектонических доменов, Н. В. Шебалин считал покрытие доменами всей территории страны, а не только известных сейсмоактивных регионов. Тем самым обеспечивалось действительно Общее районирование, по крайней мере, с точки зрения методики. Сами домены были двух типов: площадные (*flat*) и осевые (*axial*). Не вдаваясь в технические детали (методика выделения, набор признаков и т.п.), рассмотрим далее в статье, как на практике реализовалась концепция домена.

Фрагмент карты сейсмотектонических доменов приведен на рис. 1. Для иллюстрации выбрана территория, которая включает как активную горную, так и малоактивную платформенную области. Рассмотрим гипотетический пункт в платформенной части (домен № 105), для которого надо оценить опасность. В публикации [Shebalin et al., 2000] домену приписана максимальная ожидаемая магнитуда $M_{\text{макс}} = 5.0$. Протяженность домена более 2500 км; он простирается от Белоруссии до Туркмении. Интуитивно ожидаемо, что домен объединяет весьма разнородные области. На момент построения карты в домен № 105 попадает всего четыре землетрясения, максимальная магнитуда $M = 4.5$ отмечена в Западной Туркмении. Каких-либо веских оснований оконтуривать столь протяженную структуру с сейсмологической точки зрения не видно: в пространственном распределении эпицентров не выделяется протяженных линейных структур. Что касается тектонической обоснованности, то ситуация также непростая. На некоторых участках активные разломы секут границу домена, на некоторых идут по границе домена, а на некоторых целиком попадают внутрь домена. Таким образом, по крайней мере не все домены представляют однородные сейсмоактивные единицы, характеризующиеся одинаковым сейсмическим потенциалом в любой своей части. Необходимо отметить, что такое пространственное взаимоотношение доменов и активных разломов во многом определяется техническими ограничениями того времени: границы доменов проводились на картах масштаба 1:2 500 000 собранных в одну «простыню» с помощью скотча. Искать за этим концептуальных оснований не следует.

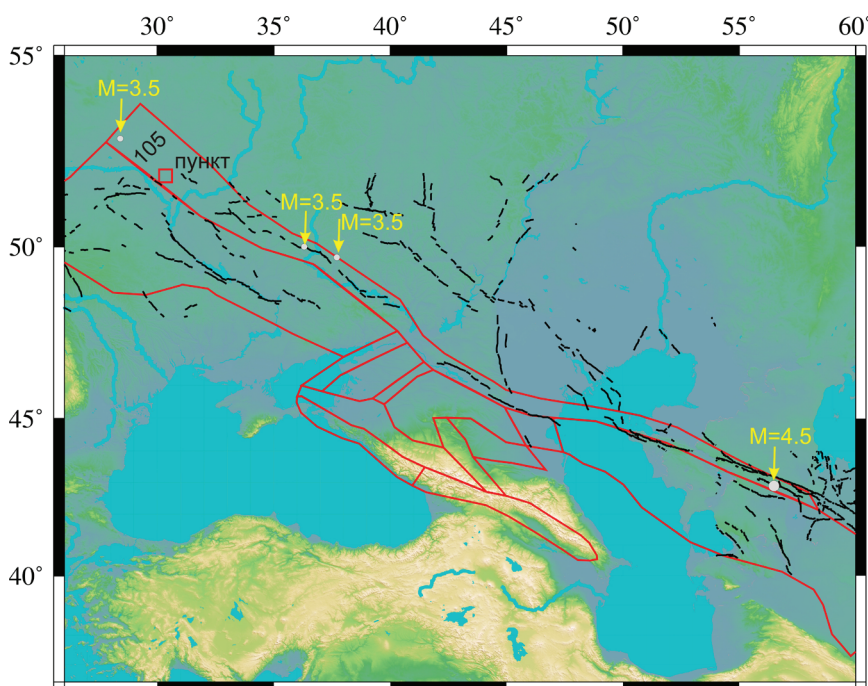


Рис. 1. Фрагмент карты сейсмотектонических доменов по [Shebalin et al., 2000]: домен № 105. Красные линии – контуры доменов, черные – активные разломы по [Бачманов и др., 2017]

Отмеченные проблемы не связаны с тем, что домен № 105 находится в малоактивной области, где нет сильных землетрясений. Аналогичные трудности можно отметить и для домена № 128 (рис. 2). В единый домен № 128 объединены горная область Кавказа с высокой плотностью активных разломов и платформенные участки.

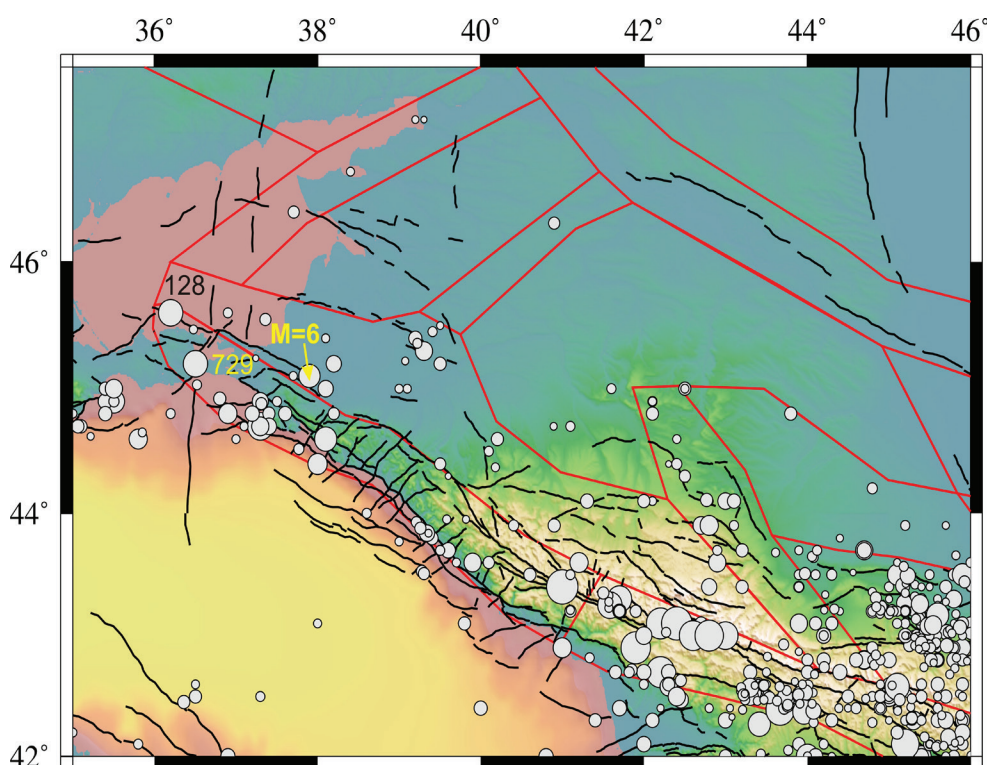


Рис. 2. Фрагмент карты сейсмотектонических доменов по [Shebalin et al., 2000]: домен № 28. Красные линии – контуры доменов, черные – активные разломы по [Бачманов и др., 2017]

Домену приписана магнитуда $M_{\text{макс}} = 6.0$. Эта магнитуда определяется землетрясением 1799 г. ($M = 6$). Согласно каталогу, эпицентр располагается недалеко от границы с доменом № 729. Активный разлом, с которым связано это землетрясение, пересекает границу между доменами и проникает в домен № 729. Домен № 729 характеризуется высокой активностью, в нем располагается палеоземлетрясение с магнитудой $M = 7.2$. С учетом точности определения координат эпицентра исторического землетрясения XIX века, высока вероятность, что и событие 1799 г. вместе с активным разломом, с которым оно связано, принадлежат соседнему домену № 729.

Эти примеры показывают, что модель сейсмотектонических доменов является сильно генерализованной. Она может быть основанием для общего сейсмического районирования, но ожидать от нее большего не оправдано.

Возникает вопрос: может стоит вообще отказаться от обобщения данных о землетрясениях и тектонике в единую модель, а использовать в качестве основы для расчетов сейсмической опасности актуальную карту активных разломов, как она есть. Рассмотрим перспективы такого подхода.

Оправдано ли построение обобщенных сейсмотектонических моделей?

22 января 2024 г. на Южном Тянь-Шане в пограничной области Киргизия – Китай произошло сильное землетрясение с $M_w = 7.0$ (Айкол). На рис. 3 показан эпицентр землетрясения на фоне предшествующей сейсмичности и карты активных разломов. Пунктиром околонуены наиболее примечательные элементы в пространственном распределении эпицентров и структуре активных разломов [Татевосян и др., 2025].

Протяженность области, выделенной черным пунктиром, около 200 км. Ее можно интерпретировать как область сейсмической брешы, что также подтверждается отсутствием документированных активных разломов в базе данных GEM. Зеленым пунктиром очерчен кластер на краю активного

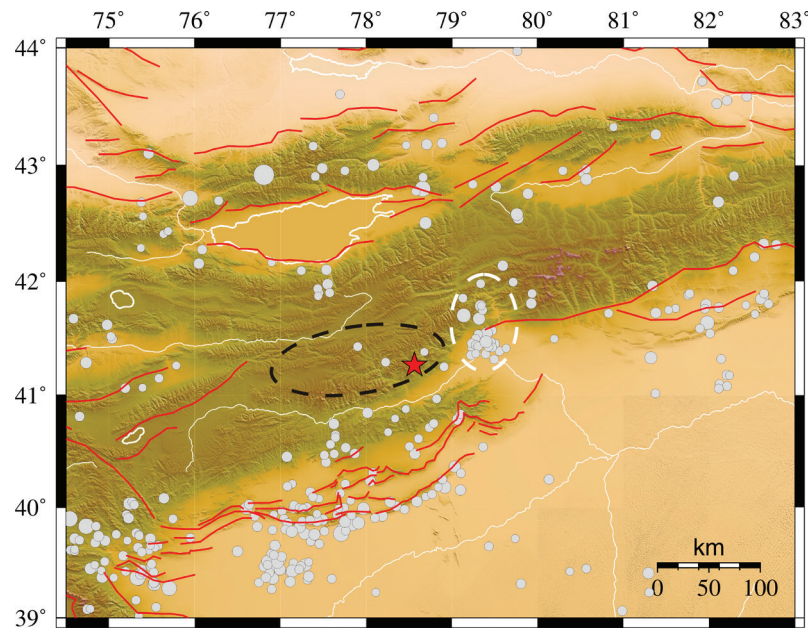


Рис. 3. Эпицентры землетрясений по данным Международного сейсмологического центра (ISC – GEM) и активные разломы по данным GEM

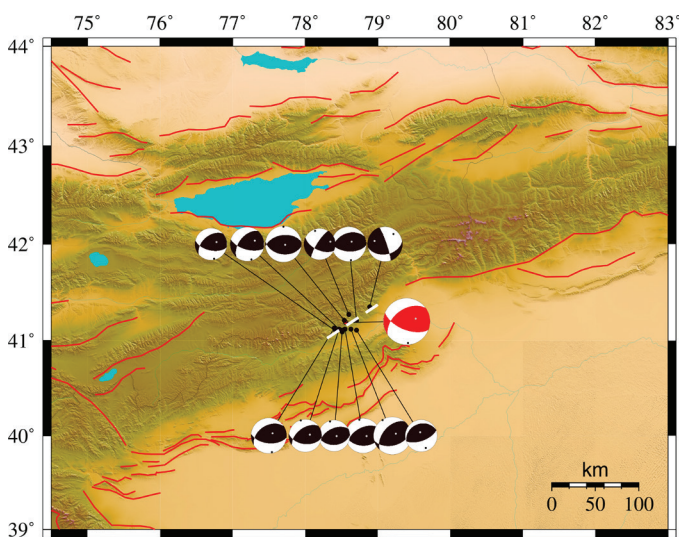


Рис. 4. Механизм главного толчка и сильнейших афтершоков землетрясения Айкол. Пунктирная линия показывает азимут простираения одной из нодальных плоскостей; длина линии равна длине разрыва в очаге по [Wells, Coppersmith, 1994]

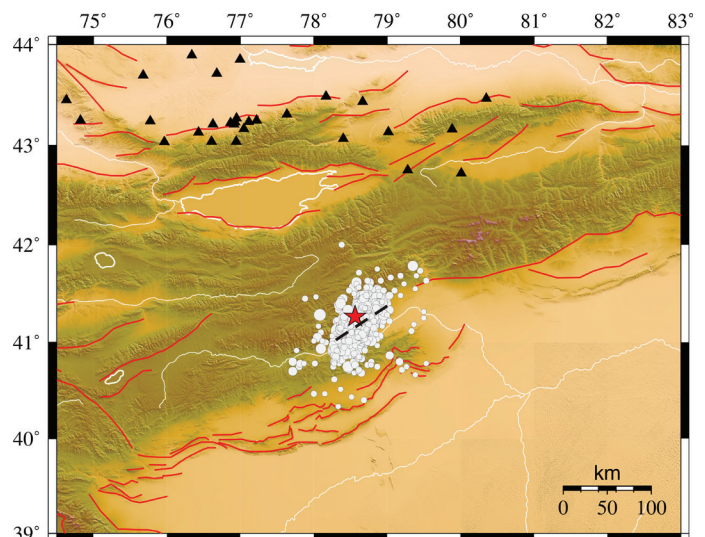


Рис. 5. Эпицентры главного толчка и сильнейших афтершоков по региональным данным (сеть сейсмических станций Национального научного центра сейсмологических наблюдений и исследований МЧС Республики Казахстан). Пунктирная линия показывает азимут простираения одной из нодальных плоскостей; длина линии равна длине разрыва в очаге [Wells, Coppersmith, 1994]

разлома. Фактически, землетрясение Айкол вместе со своей афтершоковой последовательностью продлило активный разлом на запад (рисунки 4 и 5).

Сильное землетрясение произошло там, где документированных активных разломов не отмечено – оно скорее продлило существующий разлом, на краю которого ранее отмечался кластер очагов землетрясений. Возникают сомнения в надежности оценки сейсмической опасности, сейсмотектонической основой которых служат только ранее картированные активные разломы. Конечно, это далеко не единственная тектоническая карта региона и, не исключено, что можно

отыскать вариант интерпретации геологических данных, в котором отмеченной брешии может не быть. Этот пример показывает, что некоторая генерализация данных при построении сейсмотектонической модели практически неизбежна: следуя концепции сейсмотектонических доменов все активные разломы, ограничивающие с юга Южный Тянь-Шань, были бы объединены в один домен.

Сильные землетрясения индивидуальны

С проблемой уровня генерализации моделей связан вопрос об уникальности сильных землетрясений. Имеется в виду широкий комплекс характеристик: предшествующая сейсмичность района, процесс вспарывания в очаге, выход разрыва на поверхность, параметры афтершоковой серии. Этот комплекс может существенно различаться даже для событий с одинаковой магнитудой. Между тем, в сейсмическом районировании рассматриваются потоки сейсмических событий различных магнитуд и соответствующие повторяемости. Такое «обезличивание» сильных землетрясений упрощает реальность.

Например, согласно решению USGS очаг рассмотренного выше землетрясения Айкол простой, без явно выраженных субисточников. Это довольно необычно для такого большого землетрясения. Для сравнения в очагах землетрясения с такой же магнитудой на Кавказе (Спитакское, $M_w = 6.9$ и Рачинское, $M_w = 7.0$) различные исследователи выделяют от трех до пяти субочагов [Haessler et al., 1992; Fuenzalida et., 1997; Вакарчук и др., 2013].

На рис. 6 показаны эпицентры двух неглубоких землетрясений с одинаковой магнитудой $M_s = 7.4$ на Алтае и Сахалине.

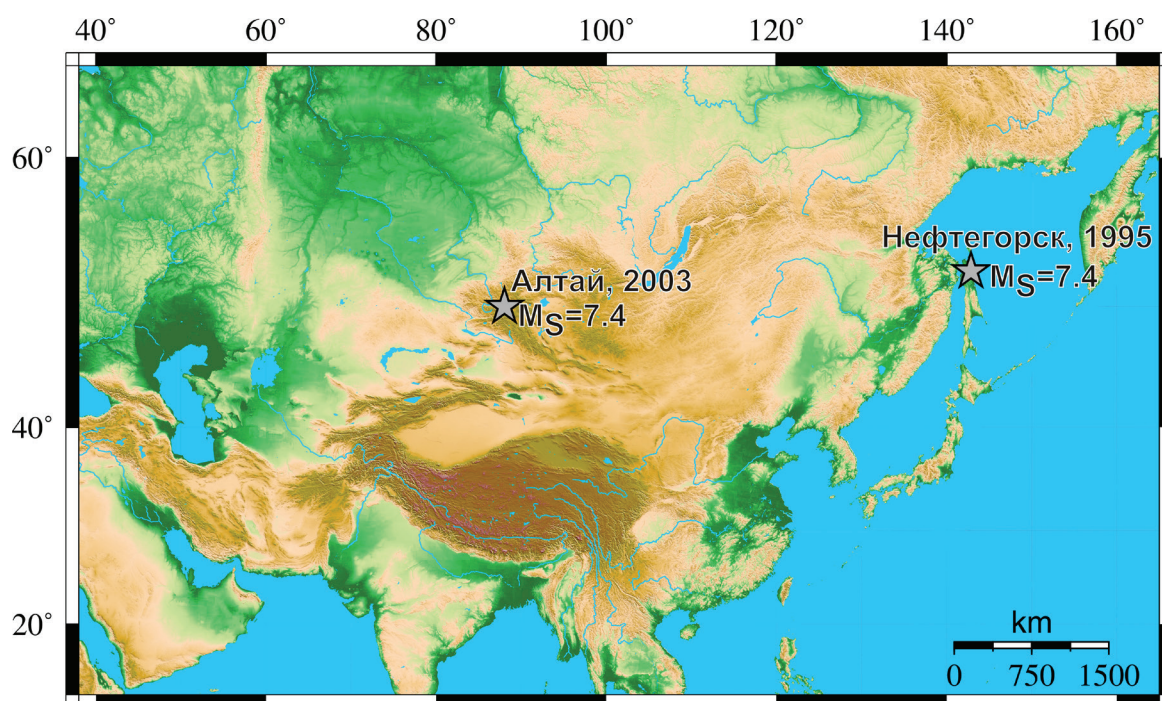


Рис. 6. Два сильных землетрясения с одинаковой магнитудой с существенно различными проявлениями на поверхности

В табл. 1 сравниваются некоторые характеристики Алтайского и Нефтегорского землетрясений.

Поверхностные эффекты сильного землетрясения не ограничиваются только вибрационными воздействиями, но также и ко-сейсмичными разрывами на поверхности. По этому признаку последствия Алтайского и Нефтегорского землетрясений с одинаковой магнитудой разительно различаются. Конечно, разницу можно объяснить тем, что землетрясения находятся в существенно разных зонах. Но можно привести другой пример, когда два землетрясения произошли с разницей около 9 часов не просто в одной зоне, но и по системе сопряженных разломов.

Таблица 1.

Сравнение Алтайского и Нефтегорского землетрясений

Алтайское, 2003 г.	Нефтегорское, 1995 г.
Магнитуда на 1.4 больше, чем у сейсмических событий непосредственно в окрестностях эпицентральной области	Магнитуда на 1.9 больше, чем у сейсмических событий непосредственно в окрестностях эпицентральной области
Специальные исследования, проведенные в эпицентральной зоне после землетрясения, выявили следы палеоземлетрясений с $M \approx 7.5$ приблизительно 1000 лет тому назад	Специальные исследования, проведенные в эпицентральной зоне после землетрясения, выявили следы палеоземлетрясений с $M \approx 7.5$ приблизительно 1800 лет тому назад
Высокомагнитудная афтершоковая серия: за три дня произошли три землетрясения в интервале магнитуд $M = 6.6-7.4$	Явный дефицит сильных афтершоков: в течение шести месяцев магнитуда сильнейшего афтершока была на 2.4 единицы меньше, чем у главного толчка
Поверхностные разломы наблюдались на отдельных участках общей протяженностью 70 км	Поверхностные разломы наблюдались цельным разрывом протяженностью 46 км
Максимальный сдвиг составил 2 м, вертикальное смещение – 60 см	Максимальный сдвиг составил 8.1 м, вертикальное смещение – 2 м

Примечание: подсвечены ячейки с совпадающими или близкими признаками

Речь идет о двух катастрофических Турецких землетрясениях в феврале 2023 г. Оба землетрясения произошли в системе Восточно-Анатолийских разломов. Магнитуда по данным GCMТ первого землетрясения (условно, главного толчка) $M_w = 7.8$ и второго (сильнейший афтершок) $M_w = 7.7$. По данным USGS очаг главного толчка моделируется тремя субочагами. Первый субочаг был небольшой, протяженностью не более 40 км и смещением в очаге около 30 см. Второй субочаг самый большой – его протяженность около 175 км, максимальное смещение – почти 7 м. Протяженность третьего субочага 150 км. Основной сейсмический момент выделился с 20 по 30 секунду. Характер вспарывания в сильнейшем афтершоке совершенно иной. В нем тоже выделяется три субочага, но процесс сразу начался с самого большого субочага. Его протяженность 75 км много меньше, но максимальное смещение 12 м заметно выше, чем у главного толчка. Основной сейсмический момент выделился почти сразу с 7 по 12 секунду.

Столь явно выраженные индивидуальные особенности сильных землетрясений, в том числе, близких по магнитуде, накладывают ограничения на возможности оценки сейсмической опасности.

Выводы

1. Используемая в настоящее время в качестве основы карт общего сейсмического районирования модель сейсмотектонических доменов является сильно генерализованной. Применять ее напрямую для оценки опасности конкретных площадок размещения объектов строительства, в том числе, повышенной опасности, не оправдано. Вместе с тем, использование для оценки опасности исключительно карты документированных активных разломов несет риски пропуска цели. Некоторый уровень генерализации необходим. Важно при этом соблюдать баланс между точностью и полнотой данных, уровнем генерализации и конкретной задачей.

2. В оценке сейсмических воздействий на площадку следует учитывать индивидуальные свойства очагов сильных землетрясений, по крайней мере, расположенных в ближней зоне (на расстоянии размеров очага). Общие подходы вероятностного анализа могут не учитывать всех аспектов воздействий, особенно в части остаточных деформаций на поверхности.

Финансирование

Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ им. О. Ю. Шмидта РАН.

Благодарности

Выражаю свою искреннюю признательность ведущим научным сотрудникам Жанне Яковлевне Аптекман и Вере Вячеславовне Быковой за ценные замечания и предложения.

Список литературы

Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 711–736. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0314>

Вакарчук Р.Н., Татевосян Р.Э., Аптекман Ж.Я., Быкова В.В. Рачинское землетрясение 1991 г. на Кавказе: многоактная модель очага с компенсационным типом движения // Физика Земли. 2013. № 5. С. 58–64. <https://doi.org/10.7868/S0002333713050128>

Бунз В.И., Медведев С.В., Ризниченко Ю.В., Шебалин Н.В. Успехи и надежды сейсмического районирования СССР // Физика Земли. 1974. № 10. С. 95–102.

Татевосян Р.Э., Пономарев А.В., Белослюдов О.М., Быкова В.В., Строганова С.М. Землетрясение на Южном Тянь-Шане 22 января 2024 г., $M_w = 7.0$: заполнение континентальной сейсмической брешки? // Физика Земли. 2025 (в печати).

Fuenzalida H., Rivera L., Haessler H., Legrand D., Philip H., Dorbath L., McCormack D., Arefiev S., Langer C., Cisternas A. Seismic source study of the Racha-Dzhava (Georgia) earthquake from aftershocks and broad-band teleseismic body-wave records: an example of active nappe tectonics // Geophys. J. Inter. 1997. Vol. 130. P. 29–46. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb00985.x>

Haessler H., Deschamps A., Dufumier H., Fuenzalida H., Cisternas A. The rupture process of the Armenian earthquake from broadband teleseismic body wave records // Geophys. J. Int. 1992. Vol. 109. P. 151–161. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1992.tb00085.x>

Shebalin N.V., Trifonov V.G., Kozhurin A.I., Ulomov V.I., Tatevossian R.E. Ioffe A.I. A unified seismotectonic zonation of Northern Eurasia // J. of Earthquake Prediction Res. 2000. Vol. 8 (1). P. 8–31.

Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length rupture width, rupture area, and surface displacement // Bulletin of the Seismological Society of America. 1994. Vol. 84 (4). P. 974–1002. <https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974>

Интернет ресурсы:

<https://www.usgs.gov/>

<http://www.isc.ac.uk/>

<https://www.gem-global-active-faults>

<https://www.globalcmt.org/>

ON THE LEVEL OF GENERALIZATION OF SEISMOTECTONIC MODELS

© 2024 R. E. Tatevossian*

Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: ruben@ifz.ru*

Seismotectonic domains are the basis for seismic hazard assessment at the level of General Seismic Zoning (GSZ). A fragment of a seismotectonic domain map is analyzed. It is shown that domains do not always represent homogeneous combinations of seismic and tectonic features, as was assumed when they were formulated. Sometimes domains represent a very high degree of generalization, combining quite heterogeneous areas. At the same time, it is shown that it is unjustified to completely abandon generalizing seismotectonic models and rely only on maps of active faults. It is suggested that clearly expressed individual features of strong earthquakes, including those of close magnitudes, impose restrictions on the possibilities of seismic hazard assessment.

Keywords: seismotectonic domains, general seismic zoning, strong earthquakes.